干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.01.07

# 2001—2017年祁连山积雪面积时空变化特征①

梁鹏斌[1]，李忠勤[1,2]，张　慧[2]

（1　西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃　兰州　730070； 2　中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站，甘肃　兰州　730000）

**摘　要：**科学监测祁连山积雪面积及变化特征对该区域气候研究、雪水资源开发利用、环境灾害预报及生态环境保护等具有重要意义。基于2001—2017年MOD10A2积雪产品和气象数据，分析祁连山积雪面积动态变化特征及与气温降水关系。结果显示：(1)2001—2017年祁连山积雪面积年际波动趋势较大，呈减小趋势，多年平均积雪面积约为$5\times10^4$ km$^2$，占祁连山总面积的25.9%；年内变化成“M”型，即在一个积雪年中有两个波峰和波谷，波峰出现在11月和1月，波谷出现在7月；季节变化波动趋势较大，夏冬季积雪面积减小趋势大于春季，秋季呈现略微增加趋势。(2)祁连山区积雪面积主要分布在3 000～4 000 m及4 000～5 000 m，积雪覆盖率随着海拔上升呈现逐渐增大的趋势；祁连山区不同坡向积雪覆盖面积差异较大，积雪覆盖率差异较小；积雪频率高值区呈典型的条带状分布，与祁连山地形相一致，呈西北—东南分布，且分布西部大于东部。(3)初步分析认为祁连山积雪面积变化对气温要素更敏感。

**关 键 词：** 祁连山；MODI10A2；积雪面积；时空变化
**文章编号：** 1000－6060(2019)01－0056－11(0056～0066)

积雪作为冰冻圈的重要组成部分，不仅是联系冰冻圈与其他组成要素的重要纽带，也是影响全球气候系统的关键因素[1]。由于积雪对地表能量收支平衡、水文循环过程、大气环流等具有显著的影响和反馈作用，被誉为气候系统变化的重要指示器[2－3]。干旱区和寒冷区，积雪既是最活跃的环境影响因子，又是最敏感的环境变化响应因子，区域积雪的长期波动是区域气候长期变化的结果[4－5]。近年来，随着遥感技术的发展，监测积雪变化已成为探测全球变暖、诊断区域气候与积雪相互作用的手段。区域气候变化导致积雪变化，对春、夏季河川径流的影响及对干旱区农牧业和脆弱的生态系统产生了严重的后果，甚至会导致旱涝灾害的频繁发生[6]。因此，掌握寒旱区积雪与气候变化的关系对寒旱区脆弱的生态环境演变和经济的可持续发展具有重要的意义。

祁连山区冬季降雪量大，夏季高温少雨，融雪径流成为该地区城市以及工农业发展的主要水资源[7]，因此长期有效地监测祁连山山区积雪面积的时空变化对研究山区融雪径流、合理调度和利用水资源、对抗冬季牧区雪灾及春夏洪涝灾害等均有现实的指导意义。陈乾等[8]利用AVHRR资料分析祁连山积雪时空特征及对气候变化的响应；郭铌等[9]利用NOAA和AVHRR资料分析祁连山1989和1998年积雪变化；王劲松等[10]利用观测资料分析祁连山积雪深度的变化；张杰等[11]利用遥感资料对祁连山1997—2004年夏季积雪面积做了分析；王金叶等[12]调查了祁连山区西水林区排露沟流域春季积雪分布规律。本研究在前人对中国祁连山积雪研究的基础上，用较长时间序列的MOD10A2积雪数据和气象数据对中国祁连山积雪面积时空变化特征及对气候的响应进行分析，较客观、全面的分析祁连山积雪时空变化特征，对了解气候变化对祁连山积雪影响，保护和合理开发利用祁连山积雪资源提供科学依据。

① **收稿日期：**2018－01－31； **修订日期：**2018－04－20
**基金项目：**国家自然科学基金面上项目(41471058)；国家自然科学基金委重大研究计划“黑河流域水—生态—经济系统的集成模拟与预测”(91425303)
**作者简介：**梁鹏斌(1993－)，男，硕士研究生，主要从事干旱区水资源研究. E-mail:1510565025@qq.com
**通讯作者：**李忠勤(1962－)，男，博士生导师，主要从事冰川与全球变化研究. E-mail:lizq@lzb.ac.cn

## 1 研究区概况

祁连山位于欧亚大陆腹地(36°30′~39°30′N,93°30′~103°E),由一系列 NW-SE 走向的平行山脉与谷地组成(图 1)。东起乌鞘岭,西至当金山口,南靠柴达木盆地,北临河西走廊,长约 800 km,宽约 300 km[13]。山势由西向东降低,是我国西北地区著名的高大山系之一,平均海拔为 3 700 m[14]。气候垂直差异大,低温高寒,降水的一部分以冰和雪的固体形式被储藏起来,成为天然的固体水库[15]。山区大气水汽含量充沛,地面降水丰富,年降水量约 250 mm,海拔 4 100 m 以上的山区终年积雪,发育着现代冰川,有"天然白色水库"之称,许多河流发源于此[16]。

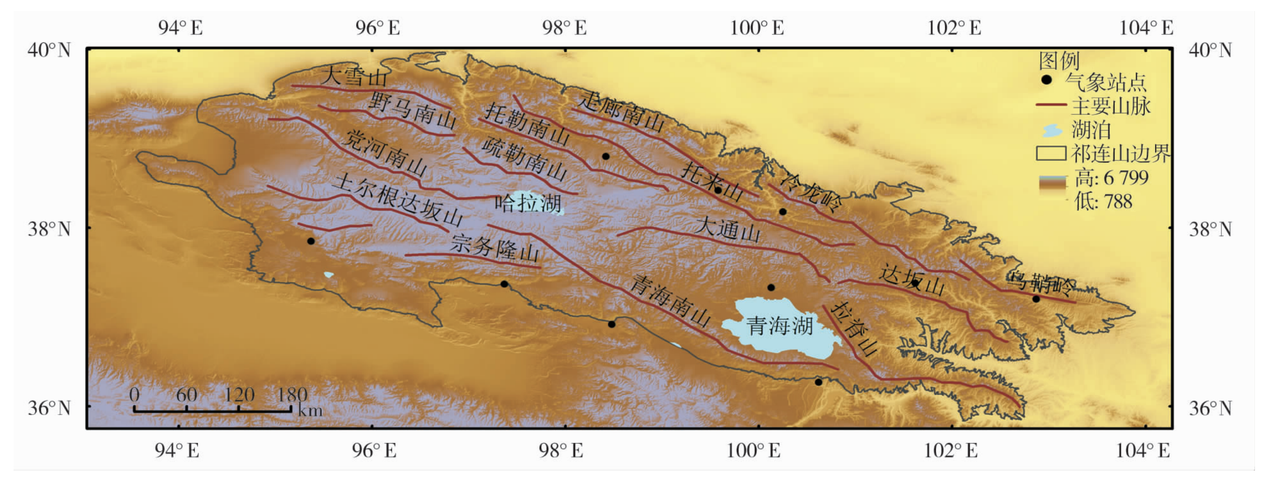



图 1 祁连山地区示意图

Fig. 1 Map showing the mountain range of Qilian

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本研究所用数据包括:MOD10A2 积雪产品数据、数字高程模型数据(STRM)、气象站数据。

(1) MOD10A2 积雪产品数据。采用美国国家冰雪产品数据中心(NSIDC)提供的 MOD10A2 的 MSC 产品,空间分辨率为 500 m,数据格式为 hdf,投影为 Sinosoidal,覆盖祁连山影像有 2 幅,轨道号为 h25v05 和 h26v05(每年有 46 期,共 782 期,其中数据缺失共计 4 期,不纳入统计范围)。

(2) 数字高程模型数据(STRM)。研究祁连山积雪面积在空间上的动态特征,采用 C 波段干涉仪干涉测量并经过"空洞"填补的 90 m 分辨率 SRTM V4.1 版本数据[17],该数据源于地理空间数据云服务平台(http://www.gscloud.cn/)。

(3) 气象站数据。气象资料来于国家气象数据网(http://data.cma.cn/),共选取 10 个国家基本气象站(图 1)的月气温及月降水数据,各台站基本信息见表 1。

**表 1 祁连山地区及其周围气象站点基本信息**

**Tab. 1 Basic information of Qilian Mountains and its surrounding meteorological stations**

| 省份 | 台站号 | 站点 | 纬度 / °N | 经度 / °E | 海拔 / m |
|---|---|---|---|---|---|
| 青海 | 52713 | 大柴旦 | 37.85 | 95.37 | 3 173.2 |
| 青海 | 52737 | 德令哈 | 37.37 | 97.37 | 2 981.5 |
| 青海 | 52754 | 刚 察 | 37.33 | 100.13 | 3 301.5 |
| 青海 | 52765 | 门 源 | 36.27 | 100.62 | 3 850.0 |
| 青海 | 52657 | 祁 连 | 37.38 | 101.62 | 2 878.4 |
| 青海 | 52856 | 恰卜恰 | 38.18 | 100.25 | 2 835.0 |
| 青海 | 52633 | 托 勒 | 38.8 | 98.42 | 3 367.0 |
| 青海 | 52833 | 乌 兰 | 36.92 | 98.48 | 3 950.0 |
| 甘肃 | 52787 | 乌鞘岭 | 37.2 | 102.87 | 3 045.1 |
| 青海 | 52645 | 野牛沟 | 38.42 | 99.58 | 3 320.0 |

### 2.2 方法

归一化差分积雪指数($NDSI$)是基于对积雪在可见光与近红外波段的反射特性和反射差的相对大小的一种测量方法,将可见光强反射波段和近红外低反射波段进行归一化处理,以便突出积雪特征[18]。其表达式为:

$$NDSI = \frac{\left(CH_{(n)} - CH_{(m)}\right)}{\left(CH_{(n)} + CH_{(m)}\right)} \quad (1)$$

式中:$n$,$m$ 分别为雪的可见光和近红外波段号。

### 2.3 数据预处理

借助 EOS/MODIS 数据中心提供软件 MODIS Reprojection Tool 对 MOD10A2 数据进行格式转换、镶嵌处理和投影变换等 3 个步骤的处理。镶嵌过程中,地图投影转换为 WGS84,利用祁连山边界对投影转换后的 MODIS 数据进行裁剪,数据输出的格式为.tiff,重采样的方法为最近邻法(Nearest neighbor)。根据 MOD10A2 产品编码及其意义,把编码为 100 (Covered lake ice) 和 200 (Snow) 归为积雪(Snow);编码为 0(Missing data)、1(No decision)、11(Night)、25(Land,free of snow)、37(Inland water or lake)、39(Ocean)、50(Cloud obscured)、254(Detector saturated)、255(Fill) 归为无雪(No snow)。

## 3 结果与分析

### 3.1 积雪时间变化

**3.1.1 积雪面积年内变化特征** 将 17 a 内每月积雪面积覆盖的平均值作为当月的积雪面积,统计出 12 个月积雪面积资料,假定当年 9 月开始至次年 8 月为一个积雪年,分析祁连山积雪面积年内变化特征(图 2)。结果表明:祁连山积雪面积年内变化成典型的"M"型,即在一个积雪年中有两个波峰和波谷。波峰位置出现在 11 月和 1 月,波谷出现在 7 月。11 月份积雪面积值最大,为 $7.22\times10^4$ km$^2$,7 月积雪面积为 $1.08\times10^4$ km$^2$,是年内最小值;冬季三个月是年内积雪面积覆盖最大月份,面积超过祁连山年均积雪面积均值。祁连山一般在 9 月中下旬积雪开始积累,经 10 月份的累积,在 11 月份积雪面积达到最大,出现第一个波峰,12 月份相比较前两个月,积雪面积有所减少,1 月份成为第二个波峰,2 月份开始积雪面积逐渐减小,入春后天气变暖,山区气温逐渐升高,融雪增加,积雪面积减小,一直持续到 7 月达最低值。

祁连山气温随季节变化显著,呈现"V"型特征,从 9 月 ~1 月逐渐降低,次年 1 月份降到最低值,1 月 ~7 月逐渐回升,降水变化与气温具有一致性;降水波动较大,夏秋降水多,冬春基本接近零。积雪面积变化与气温显著相关,9 月份 ~11 月温度逐渐降低,积雪面积不断增加,为积累时期;1 月 ~2 月,积雪面积减小,主要是由于山区气温开始回暖,部分积雪融化,面积减小,12 月份成为这几个月积雪面积最小的月份。

**3.1.2 积雪面积年际变化特征** 对祁连山 2001—2017 年连续 17 a 的积雪面积进行统计得到积雪覆盖年际变化特征(图 3)。近 17 a 祁连山积雪面积年际变化趋势较为复杂且年际波动幅度较大,呈减小趋势,多年平均积雪面积约为 $5\times10^4$ km$^2$,约占祁连山总面积的 25.9%。其中 2004 年出现 16 a 间积雪面积最大值,为 $6.14\times10^4$ km$^2$,2013 年出现积雪面积最小值,仅为 $3.81\times10^4$ km$^2$。2001—2004 年积雪面积呈显著的波动增加趋势,年平均增加速率 0.69 km$^2$·a$^{-1}$,2005—2008 年与之前相比较,虽然积雪面积有所增加,呈上升趋势,但速率缓慢,2009—2013 年是积雪面积减小期,由 2009 年 $4.94\times10^4$ km$^2$ 的减小到 2013 年的 $3.81\times10^4$ km$^2$,2014 年与 2015 年较之前增加,在 2016 年开始递减。

对祁连山区 2001—2017 年 17 a 间春、夏、秋、冬四季积雪面积进行年际分析,积雪面积的季节变化波动趋势较大,线性趋势表明春季呈现微弱减小态势,夏冬季积雪面积减小趋势较大,秋季呈略微

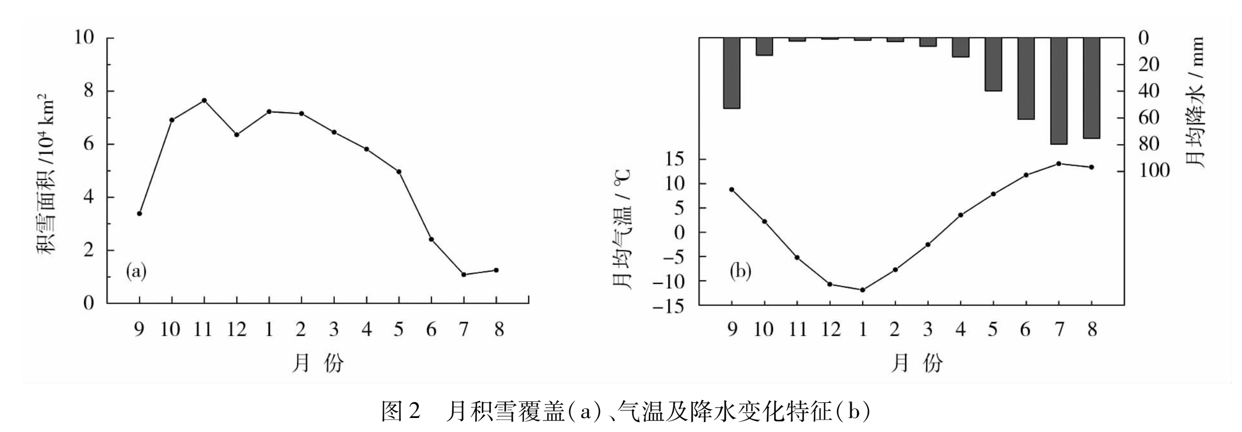



图 2 月积雪覆盖(a)、气温及降水变化特征(b)

Fig. 2 Monthly variations of snow cover(a) and air temperature and precipitation(b)

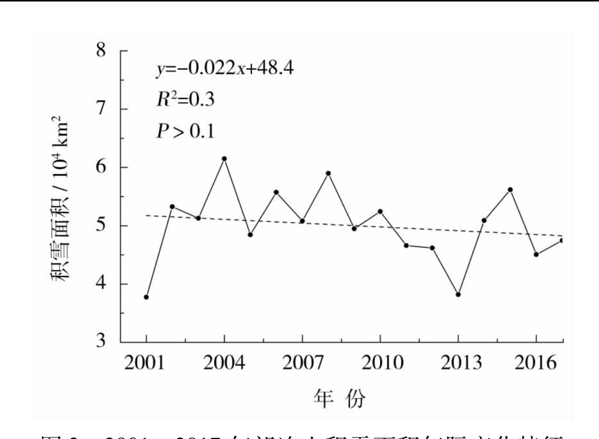



图 3　2001—2017 年祁连山积雪面积年际变化特征

Fig. 3　Annual variation of snow cover from 2001 to 2017 in the Qilian Mountains

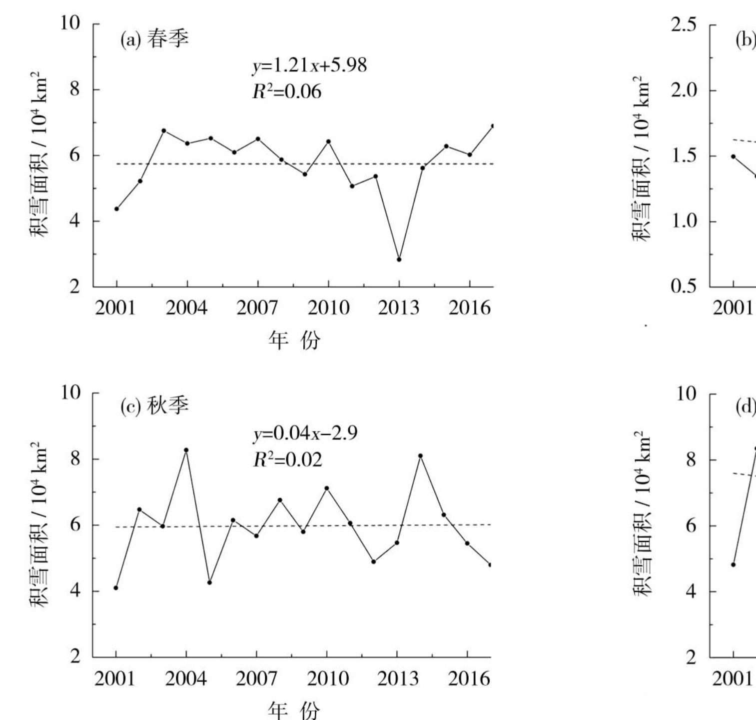
增加趋势(图 4)。冬季多年平均积雪面积在四个季节中最大,为 $6.91\times10^4$ $km^2$,其次为春季,面积最小的季节为夏季,夏季积雪面积主要为冰川表面粒雪和山顶累积的稳定性积雪。

最大积雪面积与最小积雪面积代表了年内积雪面积峰值,其大小对年平均积雪面积有重大影响,对祁连山区 17 a 间每 8 d 合成影像的最大与最小积雪覆盖进行统计(图 5),祁连山区年积雪覆盖率最大范围介于 37.4% ~86.2%,出现时间大多为 1 月和 12 月;最小覆盖范围为 1.8% ~ 5.6%,出现时间多为 7 月、8 月。积雪覆盖率最大值波动比最小值波动更加剧烈,表明祁连山区降雪变化较大。

### 3.2　积雪空间变化

**3.2.1　不同海拔带积雪变化特征**　地形是影响祁连山积雪面积覆盖的重要因素,海拔差异造成气温和降水的显著不同,导致不同高度带内积雪面积分布状况不同。分析积雪覆盖频率随海拔高程变化,将研究区按不同海拔划分为 4 大高程带,海拔介于 2 000 ~3 000 m,3 000 ~4 000 m,4 000 ~5 000 m 以及海拔 5 000 m 以上,各高程带分别占祁连山总面积的 12%、57.5%、29.8%及 0.7%。

总体上,祁连山区积雪主要分布在 3 000 ~ 4 000 m以及 4 000 ~5 000 m 之间,2 000 ~3 000 m 以及 5 000 m 以上的区域积雪面积分布较少(图 6a),而积雪覆盖率(各海拔带积雪面积占该海拔带总面积的比率)随着海拔的上升而呈现出逐渐增大的趋势(图 6b)。海拔介于 4 000 ~5 000 m 及 5 000 m 以上的区域积雪面积小,积雪覆盖率高;3 000 ~ 4 000 m 的区域积雪面积大,积雪覆盖率低;2 000 ~ 3 000 m 的区域无论是积雪面积还是积雪覆盖率都较低,显然,这与各高程带面积显著相关。海拔介于 3 000 ~4 000 m 和 4 000 ~5 000 m 的区域积雪面积年际波动趋势较大,2 000 ~3 000 m 和 5 000 m 以上



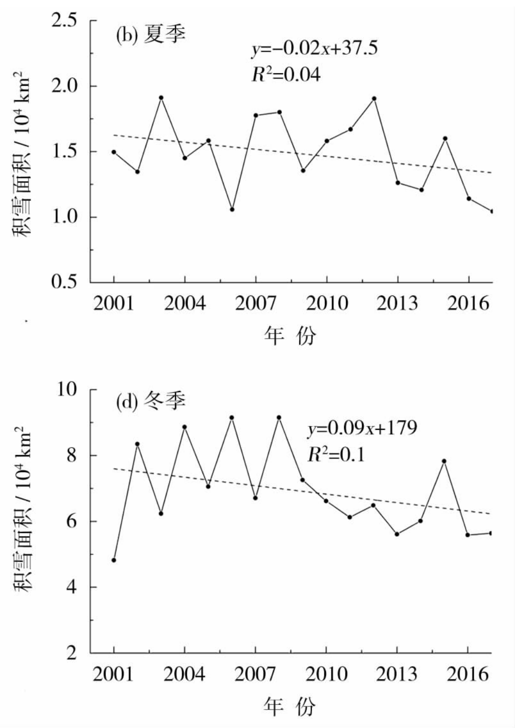




图 4　祁连山春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)积雪面积年际变化特征

Fig. 4　Annual variations of snow cover in spring, summer, autumn and winter in the Qilian Mountains

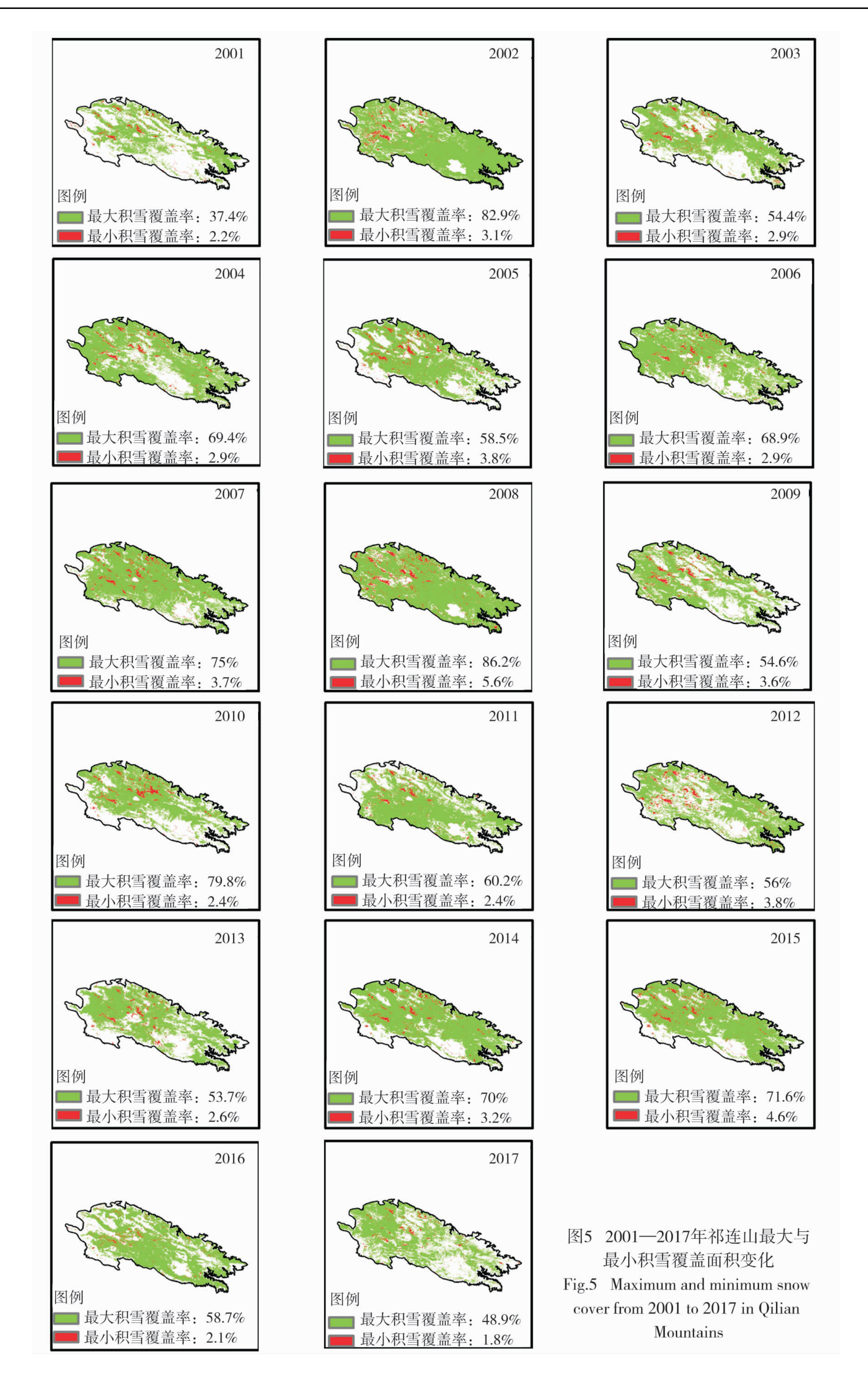



图5　2001—2017年祁连山最大与最小积雪覆盖面积变化

Fig.5　Maximum and minimum snow cover from 2001 to 2017 in Qilian Mountains

的区域积雪面积年际变化相对平稳;海拔介于 3 000 ~4 000 m 及 2 000 ~3 000 m 的区域积雪覆盖率年际变化特征相似。

**3.2.2 不同坡向积雪变化特征** 热量和气流是影响积雪形成并得以持续存在的重要因素。迎风坡,受暖湿气流影响,降水量大,暖湿气流越过山体,到达背风坡后,水汽含量减少,降水量小。所以积雪面积迎风坡高于背风坡。山体阳坡太阳辐射强,温度高;而阴坡太阳辐射相对较弱,温度低。所以,积雪面积阳坡小于阴坡[19]。将研究区按照方位角重分类为 8 个坡向:北坡(0° ~22.5°及 337.5° ~360°)、东北坡(22.5° ~67.5°)、东坡(67.5° ~112.5°)、东南坡(112.5° ~157.5°)、南坡(157.5° ~202.5°)、西南坡(202.4° ~247.5°)、西坡(247.5° ~292.5°)以及西北坡(292.5° ~337.5°),然后提取各坡向的积雪像元,进行积雪覆盖率计算并统计。各坡向分别占祁连山总面积的 15.8%、13.8%、8.7%、17.7%、9.7%、15.7%、8.9%、9.7%。

祁连山区不同坡向积雪覆盖面积差异较大(图 7a),西坡、西北坡、北坡以及东北坡积雪面积较大,远远多于东坡、东南坡、南坡以及西南坡,而不同坡向的积雪覆盖率差异较小(图 7b),西坡、西北坡、北坡、东北坡以及东坡的积雪覆盖率整体上要高于西南坡、南坡以及东南坡。祁连山大气水汽和地面降水受西风带、偏南季风(南亚季风和高原季风)以及东亚季风的共同影响,导致西坡与西北坡的积雪显著高;祁连山东北部受东亚季风影响比较明显,东坡与东北坡积雪较高。

**3.2.3 积雪频率空间变化特征** 一个像元的积雪覆盖次数即为这个像元的积雪频率,通过 ArcGIS 中栅格运算合成祁连山地区 2001—2016 年每年的积雪频率及累积积雪频率分布图(图 8)。祁连山积雪频率高值区呈微弱减少趋势,积雪频率高值区呈典型的条带状分布,呈西北—东南分布,积雪频率的高

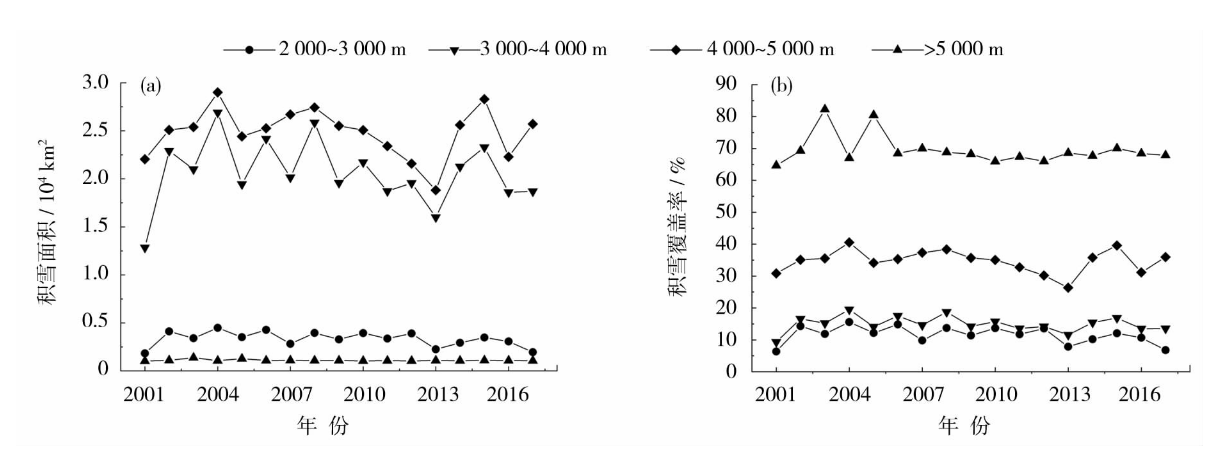



图 6 2001—2017 年祁连山各海拔积雪面积与积雪覆盖率年际变化特征

Fig. 6 Interannual variation characteristics of snow cover area (a) and snow cover ration (b) at different elevations in Qilian Mountains from 2001 to 2017

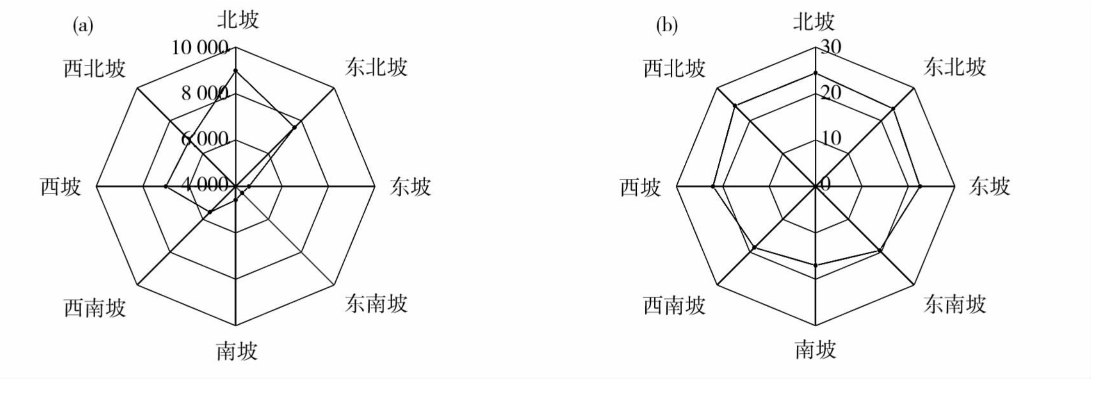



图 7 祁连山各坡向积雪覆盖面积(a)与积雪覆盖率(b)分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of snow cover area (a) and snow cover ratio (b) on each slope of Qilian Mountain

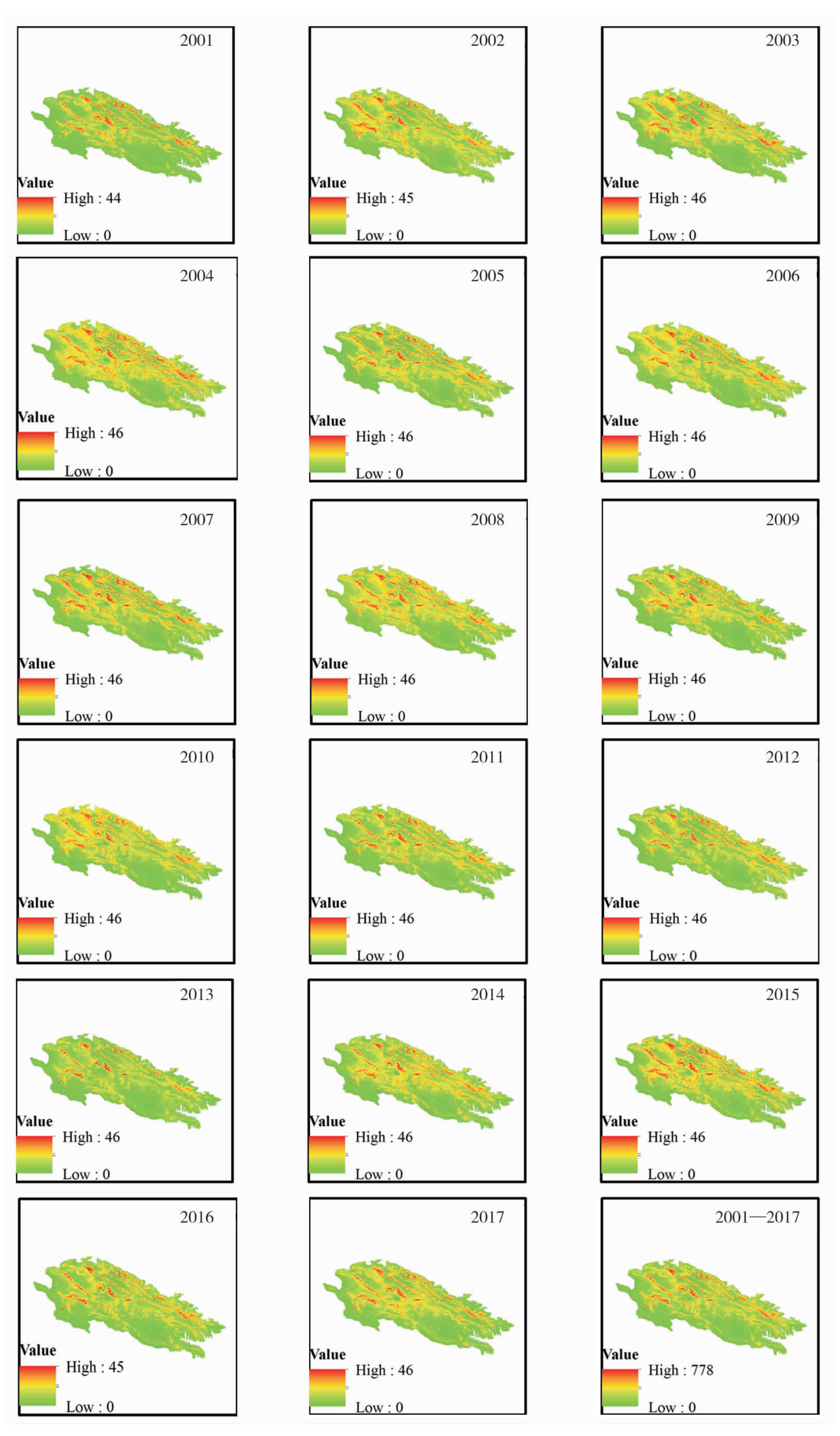



图 8　2001—2017 年祁连山积雪频次变化特征

Fig. 8　Variation characteristics of snow cover frequency in Qilian Mountains from 2001 to 2017

值区分布西部远大于东部区域,基本上与祁连山地形的分布相一致,即海拔高的地方积雪频率亦高,周围地势低的区域形成了一些积雪频率次高值区,而地势低的区域积雪频次较低。对比 2001—2017 年的累积积雪频次图,祁连山地区积雪频率高值区的形成可归结于两个方面:一是祁连山稳定性积雪较多,二是大多数冰川表面有粒雪覆盖。

## 4 结果分析

### 4.1 积雪面积与气象要素的关系

气温和降水是表征气候变化的两个主要因子,较低温度与降雪是积雪形成和存在的天气条件[20]。对气温和降水与积雪面积做了相关分析(表2),祁连山年际平均积雪面积与降水呈微弱正相关,与气温呈显著负相关。可以推断,气温是控制积雪面积变化的主要因子,此外,分析发现,风速与积雪面积的负相关性显著,风速快,风力大,出现风吹雪,造成雪的再分配来影响积雪面积变化。

**表 2 2001—2017 年平均积雪面积与气象要素的相关分析**

**Tab. 2 Correlation coefficients between snow cover area and meteorological factors**

| | 积雪面积 | 气温 | 降水 | 最大风速 |
|---|---|---|---|---|
| 积雪面积 | 1 | | | |
| 气温 | -0.67* | 1 | | |
| 降水 | 0.239* | 0.386* | 1 | |
| 最大风速 | -0.54* | 0.32* | -0.085* | 1 |

注:* 为相关系数通过 0.01 水平(双侧)检验

近年来祁连山气温呈上升趋势,气温倾向率为 0.29 ℃·(10 a)$^{-1}$,低于近百年全球平均升温速率 0.4~0.8 ℃;降水呈增加趋势,倾向率为47.9 mm·(10 a)$^{-1}$。气温高,积雪覆盖面积小,气温低,积雪覆盖面积大;降水与积雪覆盖面积对应关系不明显。2001—2017 年祁连山积雪覆盖面积呈减小趋势,2013 年年均气温为 2.3 ℃,仅次于 2016 年年均温 2.6 ℃,积雪面积却出现了 17 a 的最低值,但 2013 年降水比 2016 年略高;2003 年积雪覆盖面积低于 2002 年,气温比 2002 年低,降水比 2002 年多,积雪面积却比 2002 年少。2001—2004 年,气温升高,积雪面积有减小趋势,而该时段内降水呈增加趋势;同样的情况出现在 2008—2013 年(图 9a、9b),可见积雪覆盖面积与降水相关性不大。冬半年气温均低于 -8 ℃,未能达到雪的熔点,对积雪面积影响不大,分析(图 9c 和 9d)发现积雪覆盖面积与冬半年气温无明确对应关系,但降雪量与积雪覆盖面积关系

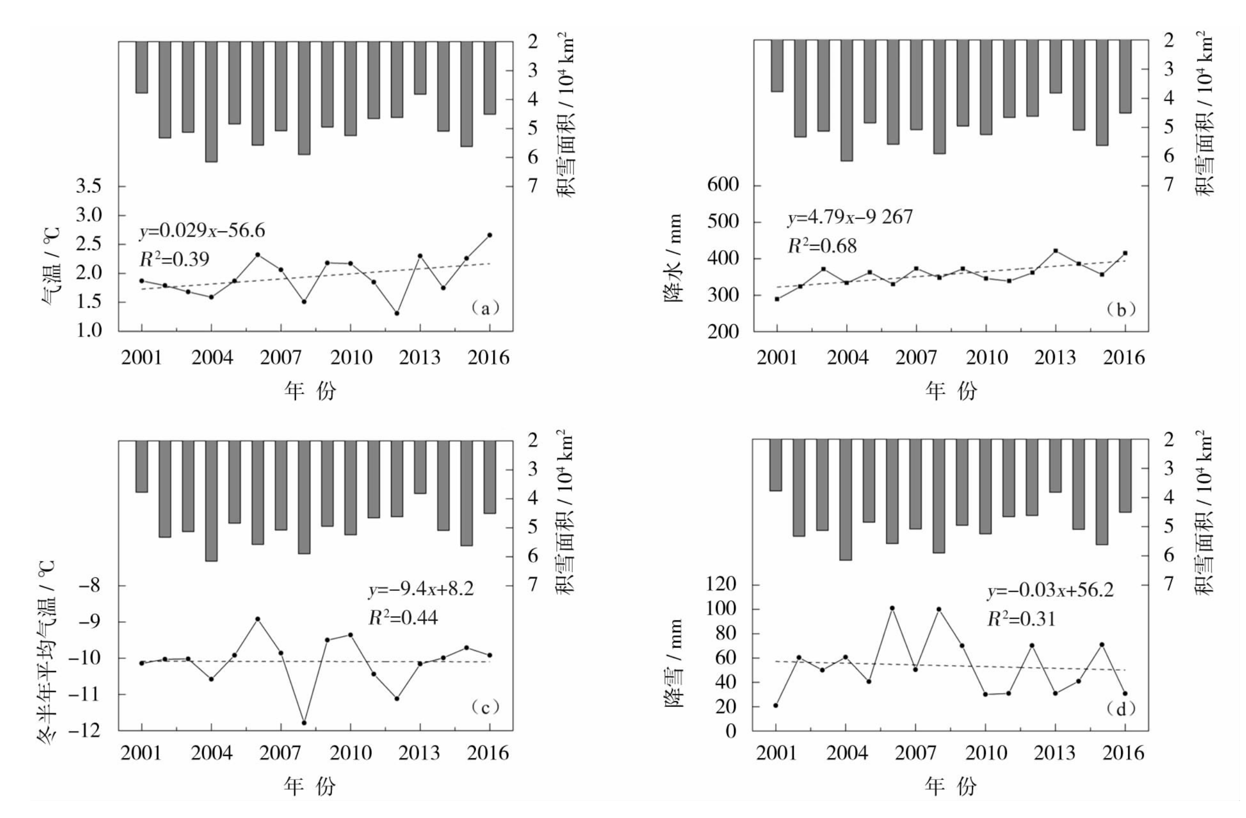



图 9 积雪面积与气温和降水的关系

Fig. 9 Snow area relationship with the temperature and the rainfall

密切,分析发现,降雪越多,积雪覆盖面积亦大。由此推断,祁连山近年来积雪覆盖面积受年均温度的影响较大,成为祁连山积雪面积的主控因素,降雪量对积雪面积有显著影响。

## 5 讨 论

为进一步探讨祁连山地区积雪时空分布特征,与蔡迪花等[21]研究进行对比,发现在全球变暖的背景下,积雪面积变化的总体趋势大致相符。在此基础上对祁连山积雪空间变化特征进行分析,探讨积雪覆盖面积对气象要素变化的响应。从时间和空间两个方面对祁连山积雪变化特征加以讨论。

时间变化特征,2001—2017 年 17 a 间祁连山积雪面积整体上呈现减小趋势,年均减小 0.02 $km^2$,分析认为造成祁连山积雪面积年均减小的原因为祁连山气温上升,这与韩兰英等人[22]在分析祁连山东段积雪面积变化特征时得出原因一致,由于研究时间段不一致,积雪面积减小数量存在差异;祁连山一般在 9 月中下旬积雪开始积累,经过 10 月份的累积,在 11 月份积雪面积达到最大,开始出现第一个波峰,12 月份相比前两个月,积雪面积减少,1 月份为第二个波峰,从 2 月份开始积雪面积逐渐减小,入春后天气变暖,山区气温逐渐升高,积雪融化,持续到 7 月份达最低值,主要由风吹雪现象通过雪的再分配影响积雪面积变化,王兴等[23]研究得出同样的结果,只是猜测这一现象的原因与风速或极端降雪事件有关;马丽娟等[24]研究表明我国积雪开始于 10 月,10 月至次年 2 月为积雪积累期,积雪峰值出现月份存在差异,表明祁连山具有一定地域特殊性。空间变化特征,祁连山区积雪覆盖率随着海拔上升呈逐渐增大趋势,气温随海拔降低,积雪常年累积,形成稳定性积雪,这与张廷军等[25]研究具有一致性;西坡、西北坡、北坡、东北坡以及东坡的积雪整体上高于西南坡、南坡以及东南坡,这种分布特征与祁连山水汽来源高度一致,祁连山北侧冬季的主要水汽来源是北冰洋和北大西洋的西北气流,冷空气路径以西北或偏北路径为主,因而北侧迎风坡的积雪较多与王兴等[23]及李岩瑛等[26]研究结果相同。此外,文中对祁连山 2001—2017 年积雪频次做了研究,发现祁连山积雪频率高值区呈微弱减少趋势,积雪频率高值区呈典型条带状分布,呈西北—东南分布,积雪频率高值区分布西部大于东部,与祁连山地形分布相一致,即海拔高积雪频率亦高,周围地势低的区域形成一些积雪频率次高值区。与平原地区积雪研究相比较,山区积雪情况更复杂,难以进行实地观测,文章从 MODIS 提取积雪面积缺乏实测资料验证,仅从年际、年内、季节以及不同海拔高度和坡向探讨了祁连山积雪面积变化,积雪消融还受地形、积温、辐射等因素影响,选取的气象站点数量少,分布不均,并不完整反映祁连山气候变化特征,应加强实地观测与遥感手段相结合,这将是下一步研究内容。

## 6 结 论

利用 2001—2017 年 MODIS10A2 积雪产品分析祁连山积雪时空变化特征及与气象要素关系得出以下结论:

(1)时间上,2001—2017 年祁连山积雪面积年际波动幅度较大,呈减小趋势,多年平均积雪面积约为 $5 \times 10^4$ $km^2$,约占祁连山总面积的 25.9%;年内变化总体上成“M”型,在一个积雪年中有两个波峰和波谷;季节变化波动趋势较大,夏冬季节积雪面积减小趋势大于春季,秋季呈略微增加趋势;

(2)空间上,祁连山区积雪主要分布在 3 000 ~ 4 000 m 及 4 000 ~ 5 000 m 之间,,积雪覆盖率随着海拔的上升呈逐渐增大趋势;不同坡向积雪覆盖面积差异较大,西坡、西北坡积雪面积较大;积雪频率高值区呈典型的条带状(西北—东南)分布,积雪频率高值区分布西部大于东部,与祁连山地形的分布相一致;

(3)祁连山山区的积雪面积同气温呈负相关,同降水量呈正相关,与风速呈显著负相关。由于祁连山气象观测站点较少,不能全面反映区域气候特征,气象因子与积雪面积变化关系较为复杂,有待深入研究。

### 参考文献(References)

[1] BROWN R D, GOODISON B E. Interannual variability in reconstructed Canadian snow cover, 1915 - 1992[J]. Journal of Climate, 1996, 9(6): 1299 - 1318.

[2] ARMSTRONG R L, BRUN E. Snow and climate: Physical processes, surface energy exchange and modeling[J]. Polar Research, 2010, 29(3): 461 - 462.

[3] ARMS TRONG R L, BRUN E. Snow and climate: Physical processes, surface energy exchange and modeling[M]. Cambridge: Cambridge Vniversity Press, 2008: 222.

[4] HUSLER F, JONAS T, RIFFLER M, et al. A satellite-based snow

cover climatology (1985 - 2011) for the European Alps derived from AVHRR data[J]. Cryosphere,2014,8(1):73 - 90.

[5] 沈永平,苏宏超,王国亚,等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(Ⅰ):水文效应[J]. 冰川冻土,2013,35(3):513 - 527. [SHEN Yongping, SU Hongchao, WANG Guoya, et al. The response of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (Ⅰ):Hydrological effect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(3):513 - 527.]

[6] 刘俊峰,陈仁升. 基于 MODIS 双卫星积雪遥感数据的积雪日数空间分布研究[J]. 冰川冻土,2011,33(3):504 - 511. [LIU Junfeng,CHEN Rensheng. Validation MODIS snow covered days by the combined using of MODIS Aqua and Terra snow cover products and in-suit observation all over China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2011,33(3):504 - 511.]

[7] 石光普,石圆圆,郭俊庭,等. 气候变暖背景下祁连山区春季积雨云变化特征[J]. 地理科学进展,2013,29(3):847 - 854. [SHI Guangpu,SHI Yuanyuan,Guo Junting,et al. Characteristics of the changes of springtime cumulonimbus (Cb) clouds in Qilian Mt. region under the background of global warming[J]. Progress in Geography,2013,29(3):847 - 854.]

[8] 陈乾,陈添宇. 祁连山区季节性积雪资源的气候分析[J]. 地理研究,1991,10(1):24 - 38. [CHEN Qian,CHEN Qianyu. Climatical analysis of seasonal snow resources in Qilian Mt[J]. Geographical Research,1991,10(1):24 - 38.]

[9] 郭铌,杨兰芳,李民轩. 利用气象卫星资料研究祁连山区植被和积雪变化[J]. 应用气象学报,2003,14(6):700 - 707. [GUO Ni,YANG Lanfang,LI Minxuan. Study of change of vegetation and snow area in Qilian Mountains using meteorology satellite data[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2003,14(6):700 - 707.]

[10] 王劲松,郭江勇,魏锋. 近 46 a 来祁连山区积雪深度的演变特征[C]//中国气象学会 2008 年会. 2008. [WANG Jinsong,GUO Jiangyong,WEI Feng. Evolution characteristics of snow depth in the Qilian Mountains in recent 46 years[C]//China Meteorological Society 2008 Meeting,2008]

[11] 张杰,韩涛,王建. 祁连山区 1997—2004 年积雪面积和雪线高度变化分析[J]. 冰川冻土,2005,27(5):649 - 654. [ZHANG Jie,HAN Tao,WANG Jian. Changes of snow cover area and snowline altitude in the Qilian Mountains,1997 - 2004[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2005,27(5):649 - 654.]

[12] 王金叶,常宗强,金博文,等. 祁连山林区积雪分布规律调查[J]. 西北林学院学报,2001,16(增刊 1):14 - 16. [WANG Jinye,CHANG Zongqiang,JIN Bowen,et al. Investigation on distribution rule of snowpack in Qilian Mountains forest region[J]. Journal of Northwest Forestry University,2001,16(Suppl):14 - 16.]

[13] 孙美平,刘时银,姚晓军,等. 近 50 年来祁连山冰川变化——基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报,2015,70(9):1402 - 1414. [SUN Meiping,LIU Shiyin,YAO Xiaojun,et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century:Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(9):1402 - 1414.]

[14] 尹宪志,张强,徐启运,等. 近 50 年来祁连山区气候变化特征研究[J]. 高原气象,2009,28(1):85 - 90. [YIN Xianzhi,ZHANG Qiang,XU Qiyun,et al. Characteristics of climate change in Qilian Mountains region in recent 50 years[J]. Plateau Meteorology,2009,28(1):85 - 90.]

[15] 强芳,张明军,王圣杰,等. 基于格点数据的 1961—2012 年祁连山面雨量特征分析[J]. 地理学报,2015,70(7):1125 - 1136. [QIANG Fang,ZHANG Mingjun,WANG Shengjie,et al. Changes of areal precipitation based on gridded dataset in Qilian Mountains during 1961 - 2012[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(7):1125 - 1136.]

[16] 巩宁刚,孙美平,闫露霞,等. 1979—2016 年祁连山地区大气水汽含量时空特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理,2017,40(4):762 - 771. [GONG Ninggang,SUN Meiping,YAN Luxia,et al. Temporal and spatial characteristics of atmospheric water vapor and its relationship with precipitation in Qilian Mountains during 1979 - 2016[J]. Arid Land Geography,2017,40(4):762 - 771.]

[17] ZYL J J V. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM):A breakthrough in remote sensing of topography[J]. Acta Astronautica,2001,48(5 - 12):559 - 565.

[18] SALOMONSON V V,APPEL I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index[J]. Remote Sensing of Environment,2004,89(3):351 - 360.

[19] 党素珍,刘昌明,王中根,等. 近 10 年黑河流域上游积雪时空分布特征及变化趋势[J]. 资源科学,2012,34(8):1574 - 1581. [DANG Suzhen,LIU Changming,WANG Zhonggen,et al. Spatio-temporal distribution characteristics of snow cover in the upper reaches of Heihe River Basin over the past 10 years and the variation trend[J]. Resources Science,2012,34(8):1574 - 1581]

[20] VALT M,CIANFARRA P. Recent snow cover variability in the Italian Alps[J]. Cold Regions Science & Technology,2010,64(2):146 - 157.

[21] 蔡迪花,郭铌,王兴,等. 基于 MODIS 的祁连山区积雪时空变化特征[J]. 冰川冻土,2009,31(6):39 - 47. [CAI Dihua,GUO Ni,WANG Xing,et al. The spatial and temporal variations of snow cover over the Qilian Mountains based on MODIS data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2009,31(6):39 - 47.]

[22] 韩兰英,孙兰东,张存杰,等. 祁连山东段积雪面积变化及其区域气候响应[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(5):109 - 112. [HAN Lanying,SUN Landong,ZHANG Cunjie,et al. The snow coverage change in eastern section of Qilian Mountain and its responding to regional climate[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2011,25(5):109 - 112.]

[23] 王兴,张强,郭铌,等. 祁连山区冬半年积雪分布及变化的遥感研究[J]. 高原气象,2010,29(2):366 - 372. [WANG Xing,ZHANG Qiang,GUO NI,et al. Remote sensing research of snow cover distribution and variation in Qilian Mountains in the winter half year of 1996 - 2002[J]. Plateu Meteorology,2010,29(2):366 - 372.]

[24] 马丽娟,秦大河. 1957—2009 年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. 冰川冻土,2012,34(1):1 - 11. [MA Lijuan,QIN Dahe. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957 - 2009[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2012,34(1):1 - 11.]

[25] 张廷军,钟歆玥.欧亚大陆积雪分布及其类型划分[J].冰川冻土,2014,36(3):481－490.[ZHANG Tingjun,ZHONG Xinyue. Classification and regionalization of the seasonal snow cover across the Eurasian Continent[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(3):481－490.]

[26] 李岩瑛,张强,孙爱芝,等.祁连山及周边地区降雪气候特征研究[J].冰川冻土,2008,30(3):383－391.[LI Yanying, ZHANG Qiang,SUN Aizhi,et al. Climate characteristics of snowfall over the Qilian Mountain and its ambient areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2008,30(3):383－391.]

# Temporal-spatial variation characteristics of snow cover in Qilian Mountains from 2001 to 2017

LIANG Peng-bin[1], LI Zhong-qin[1,2], ZHANG Hui[2]

(1 *College of Geography and Environment Sciences*, *Northwest Normal University*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China* ;
2 *State Key Laboratory of Cryospheric Science/Tianshan Glaciological Station*, *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources*, *CAS*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*)

**Abstract**: To monitor scientifically the snow cover and its change characteristics in the Qilian Mountains if of important significance for the regional climate research, the development and utilization of snow meltwater, the forecast of natural disasters and ecological environmental protection. Based on the MOD10A2 snow products and meteorological data from 2001 to 2017, the dynamic changes of snow cover in the Qilian Mountains and its relationship with temperature and precipitation were analyzed. The results show as follows: (1) The average snow cover area in the Qilian Mountains was about $5\times10^4$ km$^2$ which accounted for 25.9% of its total area. The snow cover between 2001 and 2017 has a large inter-annual fluctuation trend showing a pattern of letter "M" which meant the Qilian Mountains has two peaks and one trough in terms of the snow cover in a year. The peak positions appeared in November and January, and the trough appeared in July. The snow cover had a relatively large seasonal variation trend which had a bigger decreasing tendency in summer and winter than that in spring and a slight increase trend in autumn. (2) The snow cover area in Qilian Mountains was mainly located in the places of an altitude in the range between 3 000 m and 5 000 m, and the snow cover tended to increase with the elevation. There was a big difference in snow cover area in different aspects in Qilian Mountains yet with a small snow coverage rate. The high-snow frequency zones showed a typical banded distribution which is basically consistent with the distribution of the Qilian Mountains, and the areas with high value of snow accumulation were much more in the west than those in the east. (3) The preliminary analysis showed that the change of snow area in Qilian Mountains was more sensitive to the temperature.

**Key words**: Qilian Mountains; MODIS10A2; snow coverage area; temporal-spatial variation